

動的サブストラクチャ法を用いたフィルダムの振動解析

東北大学工学部 (E) 柳沢 栄司
同 大学院 (学) 園部 好洋

1. はじめに

フィルダムのようにマッシブな構造物では、振動時に地盤の影響を受けるばかりでなく、堤体の振動が地盤にも伝わるため、堤体の応答だけを議論したのでは不十分である。地盤-構造物の動的相互作用を考慮した応答解析手法として、動的サブストラクチャ法がある。筆者らはこの手法を用いて、堤体の応答解析を行ったので、その結果を報告する。

2. 解析手法

動的サブストラクチャ法の特徴は、地盤と堤体を独立に解析し、堤体と地盤の間にある節点(connection-point)に関する平衡条件、適合条件によって両者を結びつけることである。いま、connection pointの自由度に関する、地盤の動的剛性を、周波数領域で、 $[X_f(\omega)]$ とすると、相互作用を考慮した堤体の運動方程式は、

$$(-\omega^2 \begin{bmatrix} M^{bb} & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C^{bb} & C^b \\ (C^b)^T & C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K^{bb} + X_f(\omega) & K^b \\ (K^b)^T & K \end{bmatrix}) \begin{Bmatrix} r^b \\ r \end{Bmatrix} = -\alpha_g^u(\omega) \{E^u\} - \alpha_g^v(\omega) \{E^v\} \quad (1)$$

ここに、 M^{bb}, C^{bb}, K^{bb} : Connection pointの自由度に関する質量行列、減衰行列、剛性行列

M, C, K : 堤体内部節点自由度に関する質量行列、減衰行列、剛性行列

r^b : Connection pointの自由度に関する変位ベクトル

r : 堤体内部節点自由度に関する変位ベクトル

$\{E^u\}^T = \langle M_1 \ 0 \ M_2 \ 0 \ \dots \ M_n \ 0 \rangle$ $\{E^v\}^T = \langle 0 \ M_1 \ 0 \ M_2 \ \dots \ 0 \ M_n \rangle$

$\alpha_g^u(\omega), \alpha_g^v(\omega)$: 入力地震加速度のフーリエ変換値

(1)式は、堤体分割数が多くなると、直接解くためにはたいへん時間がかかるので、モードルアナリシスの概念を応用して、 m 個の一般化座標系に変換しておく。ただし、ここで用いる固有値、固有ベクトルは、地盤-堤体相互作用系に関する正規直交モードで、次の解である。

$$[K_c + \tilde{X}_f(0)] \Phi = -\lambda^2 [M_c] \quad (2)$$

$$\text{ここに } K_c = \begin{bmatrix} K^{bb} & K^b \\ (K^b)^T & K \end{bmatrix} \quad \tilde{X}_f(0) = \begin{bmatrix} X_f(0) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_c = \begin{bmatrix} M^{bb} & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}$$

(2)式から求められる固有モードのうち、低次の固有振動数に対応するものから10個とり出し、(1)式の解として

$$r_c(\omega) = \sum_{j=1}^{10} \phi_j Y_j(\omega) \quad \text{ただし } r_c^T(\omega) = \langle r^b \ r \rangle \quad (3)$$

とする。さらに、(3)式を(1)式に代入して、固有モードの直交性を用いてまとめると、運動方程式として

$$(-\omega^2 [I] + i\omega [\Phi]^T [C] [\Phi] + [\lambda^2] + [\Phi]^T [\tilde{X}_f(\omega) - \tilde{X}_f(0)]) \{Y(\omega)\} = -[\Phi]^T (\alpha_g^u(\omega) \{E^u\} + \alpha_g^v(\omega) \{E^v\}) \quad (4)$$

が得られる。(4)式を ω ごとに $Y(\omega)$ について解き、(3)式を用いれば解が得られる。

3. 系の減衰性の評価

解析で用いた減衰力は、1)地盤に対して、Constant hysteretic モデル($\eta=0.03$)とViscous boundary モデル、2)堤体に対して、Constant hysteretic モデルと速度比例型のVoigt モデルである。Viscous boundary の減衰力は、水平方向 ρV_p 、鉛直方向 ρV_s である。また、Voigt モデルについては、筆者らが過去に行った応答計算の例を参考にして、簡便なRayleigh Dampingにより表現している。

$$[C]_v = 0.35 [M] + 0.05 [K_c] \quad (5)$$

4. 解析結果と考察

解析した地盤-堤体のモデルをFig-1に示す。地盤のモデルは、112要素75節点で水平な成層地盤を4層設け、層ごとに物性値を与えている。堤体は44要素31節点で、コア部とロック部を設定した。入力した地震波は、1978年宮城県沖地震の際、樽水ダム(宮城県名取市)のギャラリーで記録されたもので、水平方向のみ入力している。比較のため、ダムの底部を拘束し従来のモデルアナリシスによる求めた剛性基盤上の堤体(Case1)の応答値をFig-2に示す。Fig-3は、弾性基盤上の堤体(Case.2)の応答値を示したものである。Case.1に比較して、Case2の応答値は、加速度で34%、変位で31%小さくなっている。また、鉛直方向加速度の堤体内分布の形状が、2つのケースで著しく異なり、さらに、鉛直加速度と水平加速度の比率は、Case.1が0.4:1であるのに対し、Case.2では0.2:1となっている。これらのことは、堤体の振動に地盤の影響が大きく反映され、特に、堤体の振動エネルギーの逸散に関して、地盤のはたき役割が大きいことを示すものであると考えられる。Fig. 6は、Case 1の堤頂応答加速度の振動数特性を示したものである。堤体の1次固有同期は、0.404sec($f=2.48$ Hz)であり、この成分が大きく強調されており、また、2Hz以下の成分が小さい。これに対し、Case 2の振動数特性(Fig. 7)では2Hz以下の成分にも、振幅の大きな部分があり、これらが堤体によらず地盤の影響を示すものであると考えられる。両者ともに5Hz以上の高周波成分は比較的小さく、堤体の振動への寄与率は、低周波側に比べて小さいことがわかる。従って、ダム自体の振動としては、低次モードが卓越するものと思われる。

(参考文献)

- (1) 例えは、川宮史和:「動的解析法による地盤-基礎-上部構造物系の地震応答解析」(第16回地震工学研究会 1980) などにも詳しい。
- (2) 沢田 長谷川 菊沢:「土構造物の振動特性」(第14回土木工学研究会 pp1233~)

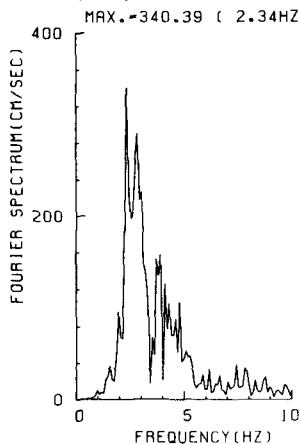


Fig. 6 剛性基盤上堤体の振動数特性

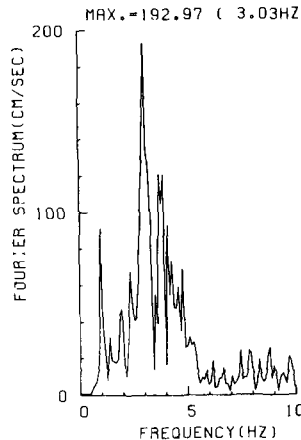


Fig. 7 弾性基盤上堤体の振動数特性

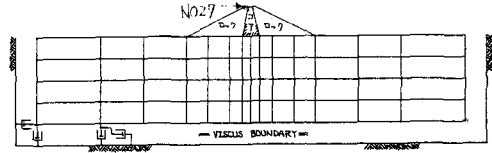


Fig-1 もの地盤と堤体

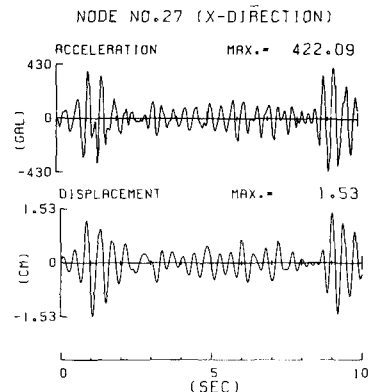


Fig-2 剛性基盤上の堤体の応答

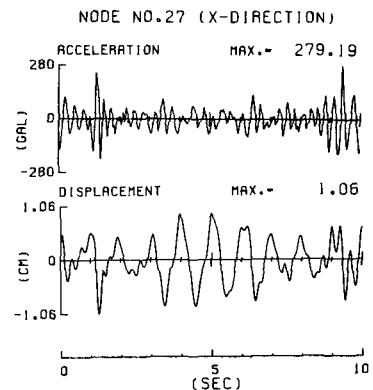


Fig. 3 弾性基盤上の堤体の応答

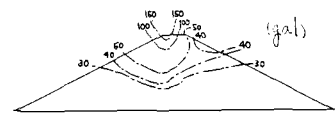


Fig. 4 剛性基盤上の堤体内の加速度分布

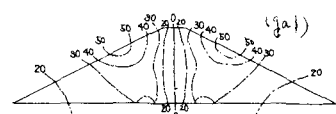


Fig. 5 弾性基盤上の堤体内の加速度分布